

Suivi des fissures de dessiccation dans la station expérimentale de Tournemire : Utilisation de la corrélation d'images numériques

S. HEDAN^a, A-L. FAUCHILLE^a, V. VALLE^b, J. CABRERA^c, P. COSENZA^a

a. Université de Poitiers, CNRS UMR 7285 IC2MP, HydrASA, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de POITIERS, 1 rue Marcel Doré, 86022 Poitiers Cedex

b. Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME, Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME, Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME

c. DEI-SARG Department, Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, B.P. 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

Résumé :

La Corrélation d'Images Numériques (CIN) a été utilisée pour la première fois dans une galerie souterraine pour suivre les fissures de dessiccation pendant un cycle climatique annuel. Cette investigation expérimentale a été effectuée sur une zone d'étude de 344×275 mm², située sur le front de galerie EST-96 de la station expérimentale de Tournemire, pendant laquelle le taux d'humidité relative (HR) et la température (T) ont été mesurées en continu pendant plus d'une année (de Mars 2011 à Mars 2012). Nos résultats démontrent la capacité de la méthode non-invasive (CIN) pour surveiller l'ouverture et la fermeture des fissures de dessiccation pendant plus d'un an. Par ailleurs, notre étude donne les résultats suivants phénoménologiques. Tout d'abord, comme on l'observe dans le laboratoire, les déformations hydriques étaient anisotropes, les déformations perpendiculaires aux fissures de dessiccation étaient presque homogènes et beaucoup plus grandes que celles qui sont parallèles aux mêmes fissures. Deuxièmement, les changements dans les ouvertures de fissures calculées à partir des champs de déplacement (avec une précision d'environ 26,9 µm) et les champs de déformations sont clairement corrélés et concomitantes à des changements de HR et T (avec 25% < HR < 99% et 6°C < T < 14°C). De plus, les fissures principales de dessiccation étaient sub-horizontales et associées à la direction des plans de stratification, notre travail a démontré l'existence de fissures sub-verticales.

Abstract :

Digital image correlation (DIC) was used for the first time in an underground gallery to monitor desiccation cracks during an annual climatic cycle. This experimental in situ investigation was carried out on a study area of 344×275 mm², located on the East96 gallery front at the Tournemire experimental station, during which the relative humidity (RH) and temperature (T) were continuously measured for more than one year (from March 2011 to March 2012). Our results demonstrate the ability of the non-invasive DIC method to monitor the opening and closure of desiccation cracks for more than one year. Moreover, our study provides the following phenomenological results. First, as observed in the laboratory, the hydric strains were anisotropic; the strains perpendicular to the desiccation cracks were almost homogeneous and much larger than those parallel to the same cracks. Second, the changes in crack apertures calculated from the displacement fields (at an accuracy of approximately 26.9 µm) and the strain fields were clearly correlated and concomitant with changes in RH and T (with 25% < RH < 99% and 6°C < T < 14°C). Moreover, although the main desiccation cracks were sub-horizontal and associated with the direction of bedding planes, our work demonstrated the existence of sub-vertical cracks.

Mots clefs : Fissures de dessiccation, déformations hydriques, Corrélation d'Images Numériques, argilite de Tournemire, comportement hydromécanique

1 Introduction

Les roches argileuses sont prises en compte dans plusieurs pays industrialisés comme le dispositif potentiel pour les déchets hautement radioactifs. Parmi les questions cruciales liées à l'évaluation de la sécurité à long terme de ces dépôts géologiques, l'étude de la zone endommagée (EDZ) est d'une importance particulière.

L'ouverture et l'extension de l'EDZ sont régies par de nombreux paramètres [1] : les propriétés du matériau de la roche (exemple : anisotropie du matériau), le champ de contrainte initial, l'existence de zones de fractures naturelles dans le massif rocheux, la géométrie de la galerie, et l'état hydrique existant dans la galerie. En ce qui concerne ce dernier, les fractures associées à la désaturation du milieu argileux ont été observées sur plusieurs fronts de galeries et dans plusieurs laboratoires de recherche souterrains, par exemple la plate-forme expérimentale de Tournemire [2] et le laboratoire du Mont Terri [3]. Ce processus de fracturation hydrique est mis en évidence in situ par des fissures sub-horizontales espacées de plusieurs décimètres sur toutes les parois verticales en contact avec l'air ambiant. En hiver (état sec), les ouvertures de fissures peuvent atteindre quelques millimètres, en été (état humide) ces fissures sont fermées. Ces fissures induites par séchage sont parallèles aux plans de stratification, ce qui suggère qu'ils sont en partie contrôlés par des modèles sédimentaires (par exemple, des différences verticales dans la granulométrie des sédiments et ou la composition minérale).

Ces observations sur des roches argileuses induites par séchage ont été obtenues de l'aide fissuromètres conventionnelles, et on peut se demander si des observations similaires auraient pu être faites en utilisant des méthodes optiques non invasives, telles que la CIN. La capacité de la technique CIN à surveiller les déformations hydromécaniques et les fractures de roche argileuse, a été démontrée en laboratoire pour différents types de chargement [4-5]. De plus, les cartes de champs de déformations obtenus en utilisant la CIN ont fourni quelques indications physiques sur les mécanismes de déformation à l'échelle microscopique, généralement à partir d'une échelle spatiale de quelques centimètres [4-5]. Cependant, en dépit de l'intérêt d'utiliser la méthode CIN pour étudier la mécanique des roches, cette technique optique n'a pas jamais été utilisée dans des galeries souterraines pour surveiller les processus de fissuration in situ. Cet article présente une application de la méthode CIN dans la galerie souterraine EST-96 de la plate-forme expérimentale de Tournemire. Au cours de cette étude, l'Humidité Relative (HR) et la Température (T) ont été mesurées pendant plus d'une année. Les objectifs de cette étude expérimentale sont : (a) d'évaluer la capacité de la méthode CIN à mesurer les champs de déformations et les cinétiques d'ouverture de fissures induites par les changements climatiques dans une galerie souterraine, (b) de corrélérer les champs de déformations mesurés et les ouvertures de fissures aux fluctuations climatiques (HR et T) dans la galerie et (c) de fournir quelques indications physiques sur le comportement des fissures associées à la désaturation et à la resaturation de roche argileuse.

2 CIN et montage expérimental

Les méthodes optiques de champs sont largement utilisées en mécanique expérimentale et permettent d'obtenir directement les données cinématiques issues de sollicitations mécaniques [6]. Parmi ces métrologies optiques, la CIN est une approche non-invasive et non destructive qui permet d'extraire le champ de déplacement. Cette méthode, simple d'utilisation, peut être appliquée dans de nombreuses expériences et sur des matériaux ou des structures industrielles. Néanmoins, cette méthode nécessite des développements spécifiques pour analyser les champs cinématiques lorsque des fissures ou de forts gradients sont présents. En géomécanique, la capacité de la méthode de la CIN à observer des localisations de déformations dans les géomatériaux et à détecter les fissures dans les roches argileuses [5] a été démontrée avec succès. Pour obtenir le champ de déplacement d'une zone soumise à une transformation mécanique, la CIN recherche le vecteur déplacement d'un sous-domaine (ou subset) situé sur la surface de l'échantillon. Ce sous-domaine est le résultat d'une variation aléatoire de l'intensité lumineuse (speckle). Cette granularité peut être obtenue artificiellement par ajout de fines particules (exemple : peinture, sable) sur la surface de l'échantillon ou par l'utilisation de la rugosité naturelle existante sur le front de la galerie (cas de notre étude).

Afin d'obtenir les champs de déplacements (u,v) , deux images sont nécessaires, une première fonction $f(x,y)$ définie les niveaux de gris acquis à l'état initial t_0 (image de référence) et une deuxième fonction $g(x,y)$ définie les niveaux de gris à un état t (image déformée). Le principe de cette méthode consiste à minimiser une fonction de corrélation, CF , sur un subset S donné [7] :

$$CF(u,v) = 1 - \frac{\int_S f(x,y) g(x^*,y^*) dx dy}{\sqrt{\int_S (f(x,y))^2 dx dy \int_S (g(x^*,y^*))^2 dx dy}} \quad (1)$$

Les composantes du vecteur déplacement (\underline{u},v) sont obtenues au centre du sous-ensemble considéré S . Cette

procédure est répétée pour tous les sous-ensembles constituant l'image. Auparavant en raison de la grande dimension du sous-ensemble (32×32 ou 64×64 pixels²), cette procédure n'était pas adaptée à la présence de discontinuités dans le champ de déplacement et ne pouvait pas être utilisée en présence de fissures. Certaines études récentes ont été conçues pour résoudre ce problème. Une nouvelle version du logiciel de CIN basée sur le même principe, Xcorrel©, a été récemment développée à l'Institut PPRIME (CNRS-Université de Poitiers) pour déterminer les champs de déplacement. Ce logiciel permet (a) de mesurer les déplacements en présence de multiple fissures dans les sous-ensembles et (b) est efficace même lorsque le « speckle » est naturel. Suite à une translation de la caméra, la précision des déplacements a été évaluée à 0,08 pixel. Cette estimation de l'erreur expérimentale ne tient pas compte de l'évolution temporelle du « speckle » naturel due à la présence de poussière dans la galerie.

Le dispositif expérimental mis en place dans la galerie (figure 1) comprend quatre parties :

1. La zone d'étude ($344 \times 275 \text{ mm}^2$) est située sur le front de la galerie. Au début de l'essai, la zone était dans un état de fissure ouverte, et quatre fissures de dessiccation sont observables.
2. Les images ont été acquises toutes les 30 minutes en utilisant une caméra CMOS IDS µeye (1280×1024 pixels²), équipée d'un objectif 50mm et d'un projecteur lumineux de 400 W. La caméra a été fixée sur un support en acier contribuant à la stabilité mécanique la galerie. L'angle entre le système de coordonnées de la caméra (x', y') et l'orientation des plans de stratification du massif rocheux (système de coordonnées (x, y)) est de 10° ($\theta = 10^\circ$).
3. Un PC contrôle conjointement l'acquisition des images et l'allumage de la lumière. Pour augmenter la durée de vie de la lampe, le spot est automatiquement mis en marche 20s avant l'acquisition d'une image et s'éteint 10 secondes plus tard.
4. Les données climatiques (HR et T) sont enregistrées toutes les 15 minutes à l'aide de capteurs placés à une distance de 2 m de la zone d'étude (figure 1).

La configuration du dispositif expérimental permet une résolution spatiale et la taille d'un sous-ensemble d'environ $269 \mu\text{m}$ et $10,8 \text{ mm}$, respectivement.

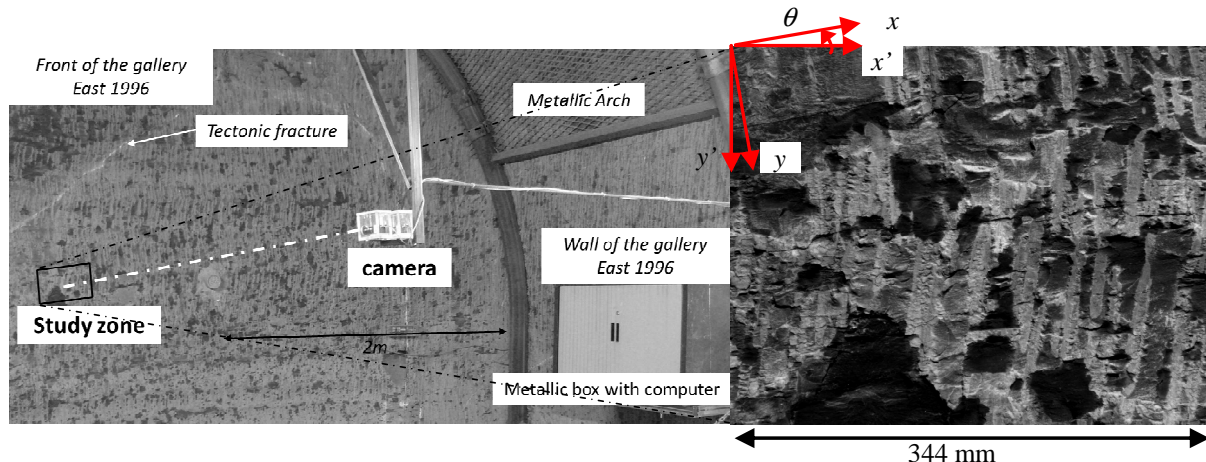


FIG. 1 – Montage expérimental dans la galerie EST-96 de la station expérimentale de Tournemire

Les données ont été acquises sur un an pour obtenir des mesures de déformation représentant un cycle climatique saisonnier complet (i.e. une saison sèche et une saison humide) dans la galerie. Ce cycle climatique était entièrement naturel, HR et T n'ont pas été contrôlées dans la galerie. La première image enregistrée à t_0 (30/03/2011 12h47min40s GMT) a été considérée comme l'image de référence. Comme mentionné précédemment, l'avantage de choisir cette date est que les quatre fissures de dessiccation sub-horizontales visibles sur notre zone d'étude du front de la galerie et parallèles aux plans de stratification étaient ouvertes (ouverture > à quelques centaines de micromètres).

3 Résultats et interprétations

Les données climatiques (HR et T) mesurées au cours de notre étude expérimentale sont présentées sur la figure 2. Les variations saisonnières de HR et T montrent clairement trois tendances générales. Tout d'abord, au début de l'essai (30 mars 2011), les variables d'état HR et T étaient d'environ 70% et 11°C ,

respectivement. HR et T augmentent lentement avec des pics hebdomadaires courts jusqu'à la fin de août 2011 pour atteindre des valeurs d'environ 90% et 13°C, respectivement. Puis, au début de l'automne, HR et T diminuent rapidement, de façon plus chaotique et les minimas sont de l'ordre de 25% et 6°C respectivement, au milieu de février 2012. Enfin, dans une troisième étape, HR et T commencent à augmenter de nouveau et atteignent des valeurs d'environ 58% et 11°C le 26 mars 2012.

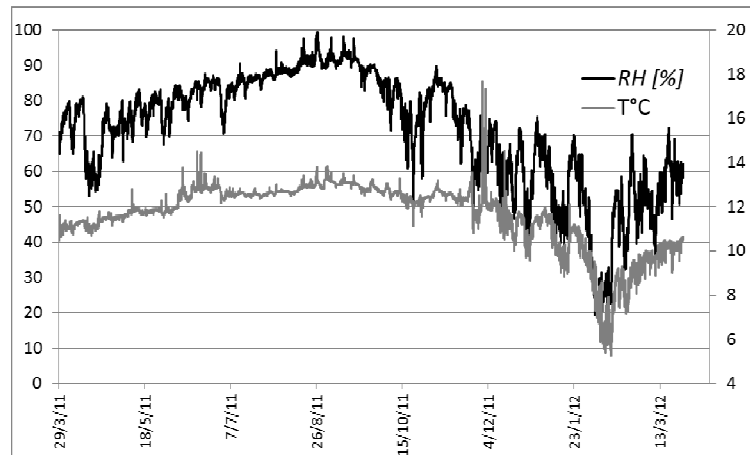


FIG. 2 – Variations saisonnières de HR et T de la galerie EST-96 durant l'acquisition des images

Les mesures spatialisées des déplacements plans $u'(x', y')$ et $v'(x', y')$ ont été obtenues pendant tout le cycle saisonnier et sont présentées sur la figure 3. Ces champs montrent clairement que les déplacements sont concentrés dans des zones étroites (« bandes ») associées aux fissures sub-horizontales ($d_{k,k+1}$) (figure 3(1)) et sub-verticales de dessiccation (d_A , d_B , et d_C) (figure 3(2)) qui ont été observées avant l'acquisition des images. Dix mois après le début du test, lorsque les valeurs de HR et T étaient minimales, les champs de déplacement apparaissent presque homogènes. Les figures 3(a) et 3(b) ne montrent pas d'initiation de nouvelles fissures de dessiccation sub-horizontales et sub-verticales durant tout le cycle saisonnier. De plus, le champ de déplacement horizontal (u') montre de nouveaux résultats jamais étudiés dans la littérature ; nos mesures ont montré l'existence de petites mais importantes discontinuités sub-verticales (d_A , d_B , et d_C) associées à des fissures de dessiccation sub-verticales qui sont perpendiculaires aux plans de stratification. Ces fissures sub-verticales ne sont pas clairement visibles au début de l'essai.

A partir des données de déplacement perpendiculaires et parallèles au litage, l'ouverture moyenne des fissures a été calculée pour chaque instant t . Pour cela une extraction automatique des extrema a été effectuée, de part et d'autre des différentes fissures. Les valeurs d'ouverture $d_{k,k+1}$ (avec k numéro de bloc, $k=1,4$) ont été calculées (a) en soustrayant les extrema des déplacements perpendiculaires aux fractures (systèmes de coordonnées (x,y)) et (b) en moyennant cette soustraction sur tous les sous-ensembles définissant la fissure. Cette même procédure a aussi été entreprise pour les fissures sub-verticales (d_A , d_B , et d_C). Pour comparer les données climatiques à des ouvertures absolues (figure 4), nous avons calculé l'ensemble des champs en prenant comme image de référence, une image où les fissures sont complètement fermées (23/08/2011 à 17h49min25s GMT avec HR=91.11% et T=13.05°C). Les résultats des ouvertures des fissures de dessiccation sub-horizontales et sub-verticales sont présentés sur les figures 4a et 4b. Tout d'abord, l'image acquise à l'instant t_0 (début d'acquisition de données), est associée à des fissures de dessiccation ouvertes (figure 4a et 4b). Deuxièmement, l'image de référence prise en compte est le 23/08/2011 à 17h49min25s GMT (HR=91,11%, T=13,05°C), a été utilisée pour calculer les valeurs d'ouverture absolues (présence d'ouverture des fissures seulement) parce que $d_{k,k+1}$, d_A , d_B , d_C étaient minimales, c'est-à-dire fissures fermées à cet instant. Sur les figures 4a et 4b, les périodes pour lesquelles il n'y a pas de données correspondent à des dysfonctionnements du spot lumineux ou du PC d'acquisition. Les résultats présentés sur la figure 4 montrent que les fissures de dessiccation sont fermées pendant au moins trois mois, en période estivale. L'ouverture maximale des fissures sub-horizontales et sub-verticales est visible en février et leur valeur est de l'ordre de 0,1 à 0,5 mm.

Bien que notre étude confirme la forte dépendance du comportement des fissures dessiccation par rapports changements climatiques, il fournit également au moins deux nouveaux résultats ou des caractéristiques qui n'ont pas été précédemment étudiés dans les études réalisées dans des installations souterraines. Tout d'abord, bien que les fissures principales de dessiccation sont sub-horizontales et clairement associées à la direction

des plans de stratification, notre travail montre que les changements climatiques peuvent également induire une certaine initiation de fissures sub-verticales. Ces fissures sub-verticales semblent présenter des valeurs d'ouverture du même ordre de grandeur que les fissures sub-horizontales. De la même manière, les fissures sub-verticales sont également corrélées avec les changements climatiques mesurés: leurs ouvertures augmentent en hiver et diminuent en été. De plus, les fissures sub-verticales observées dans notre zone d'étude sont clairement reliées aux fissures sub-horizontales; l'initiation des fissures sub-verticales est dépendante de la présence de fissures sous-horizontales. Cette association de fissures sub-verticales et sub-horizontales pourrait initier un effet d'écaillage.

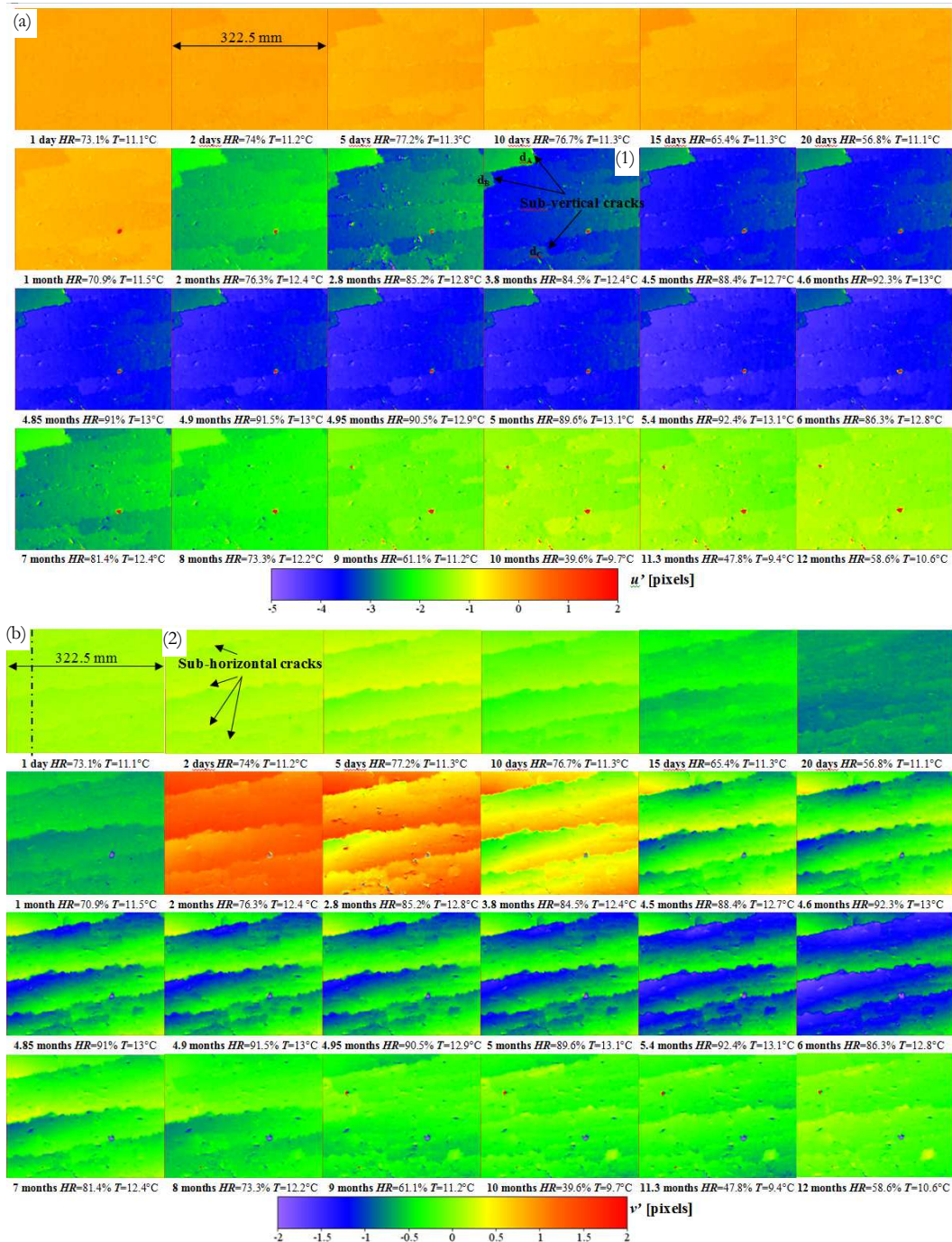


FIG. 3 – Champs u' (a) et v' (b) liés au système de coordonnées de la caméra (x',y') pendant un cycle saisonnier. Le nombre de jours depuis le début de l'acquisition, HR et T sont indiqués sous les champs.

Deuxièmement, bien que les ouvertures de fissure mesurées sur les deux sites (expérimentale de Tournemire gare et du Mont Terri laboratoire [3]) étaient du même ordre de grandeur (c'est à dire, de quelques dixièmes de millimètre), l'évolution de l'ouverture de fissure au Mont Terri a montré une tendance qui n'a pas été observée à Tournemire en utilisant la méthode CIN. A Tournemire, l'ouverture de fissure revient à sa valeur

initiale après une période d'un an d'acquisition de données. La tendance des données de déplacement observées au site du Mont Terri conduit, après presque quatre ans de suivi, à une fermeture résiduelle des fissures d'environ 1 mm [3]. Les auteurs ont interprété cette tendance sur deux hypothèses: (a) une convergence globale à l'échelle verticale de la galerie ou (b) une réduction de la résistance mécanique due à la différence entre la pression qui existe dans les minéraux argileux gonflants et les valeurs élevées de succion dans la galerie pendant l'hiver

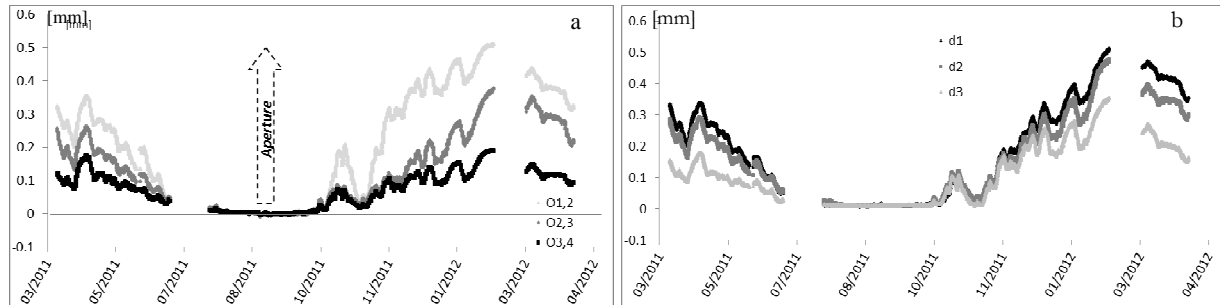


FIG. 4 – ouvertures des fissures sub-horizontales(a) et sub-verticales (b) en fonction de temps.

4 Conclusion

La méthode optique non-invasive CIN a été utilisée pour la première fois dans une galerie souterraine de Tournemire, au cours duquel HR et T ont été mesurées en continu pendant plus d'une année. Cette étude expérimentale in situ a démontré la capacité de la méthode CIN à suivre (a) les déplacements spatialisés de la roche argileuse induits par les variations climatiques et (b) les ouvertures et les fermetures de fissures de dessiccation lors d'une variation saisonnière naturelle (1 an). Actuellement l'acquisition de nouvelles images du front de galerie se poursuit et les ouvertures de dessiccation, ainsi que les déformations hydriques sont comparées aux variables climatiques (HR, T). Les premiers résultats montrent que le comportement hydromécanique du massif rocheux évolue entre deux courbes « enveloppe » dont l'interprétation est difficile nécessitant un couplage multi-échelles et multi paramètres (exemple : structure et organisation spatiale de la roche argileuse).

References

- [1] Blümling P, Bernier F, Lebon P, Martin CD. The Excavation-Damaged Zone in clay formations - Time-dependent behaviour and influence on performance assessment, *Physics and Chemistry of the Earth*, 32,588-599, 2007
- [2] Matray JM, Savoye S, Cabrera J, Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France), *Eng Geol*, 90,1-16, 2007.
- [3] Möri A., Bossart P., Matray JM, Franck E, Fatmi H, Ababou R, Mont Terri Project: cyclic deformations in the Opalinus Clay, In: *proceedings of the International Meeting of Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinements*, Nantes, 103-124, 2010.
- [4] Yang D, Bornert M, Chanchole, Wang L, Valli P, Gattmiri B, Experimental investigation of the delayed behavior of unsaturated argillaceous rocks by means of Digital Image Correlation techniques, *App Clay Sci*, 54, 53-62, 2011.
- [5] Hedan S, Cosenza P, Valle V, Fauchille AL, Dudoignon P, Cabrera J, Investigation of the damage induced by desiccation and heating of Tournemire argillite using digital image correlation, *Int. J. of Rock Mech and Min Sci* 51, 64-75, 2012.
- [6] Grédiac M. The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations. *Composites: Part A: applied science and manufacturing*, 751-761, 2004
- [7] Bruck H, McNeill S, Sutton M, Peters W. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Exp Mech*, 29, 261-267, 1989.